

УДК 621.315.592.01

МЕХАНИЗМ ТРАНСПОРТА ЗАРЯДА В БЕСФОРМОВОЧНОМ МЕМРИСТОРЕ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ

© 2020 г. О. М. Орлов^{a, b, *}, А. А. Гисматулин^{c, d, e}, В. А. Гриценко^{c, d, e}, Д. С. Мизгинов^{a, b, **}^a Научно-исследовательский институт молекулярной электроники,
1-й Западный проезд, 12/1, Зеленоград, Москва, 124460 Россия^b Московский физико-технический институт, Институтский переулок, д. 9,
Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия^c Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО Российской АН,
пр. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090 Россия^d Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090 Россия^e Новосибирский государственный технический университет, пр. Маркса, 20, Новосибирск, 630073 Россия

*E-mail: oorlov@niime.ru

**E-mail: dmizginov@niime.ru

Поступила в редакцию 13.03.2020 г.

После доработки 01.04.2020 г.

Принята к публикации 01.04.2020 г.

Оксид кремния и нитрид кремния являются двумя ключевыми диэлектриками в кремниевых устройствах. Преимущество нитрида кремния перед другими диэлектриками заключается в том, что нитрид кремния совместим с кремниевой технологией. Несмотря на многие проведенные исследования, механизм переноса заряда в элементах хранения резистивной памяти на основе нитрида кремния все еще не ясен. Требуется детально изучить механизм переноса заряда в мемристоре на основе нитрида кремния, чтобы дополнительно улучшить элемент хранения информации ячейки и создать матрицу из этих элементов. Структуры металл–нитрид–оксид–кремний, которые проявляют мемристорские свойства, были получены с использованием химического осаждения из паровой фазы при низком давлении при 700°C. Изготовленная структура элемента хранения резистивной памяти на основе металл–нитрид–оксид–кремний не требует процедуры формовки. Кроме того, такой мемристор имеет окно памяти около 5 порядков. Мы установили, что основным механизмом переноса заряда в МНОП мемристоре в высокоомном состоянии является модель тока с ограниченным пространственным зарядом ловушек. В состоянии низкого сопротивления механизм переноса заряда описывается моделью тока с ограниченным пространственным зарядом с заполненными ловушками. Параметры ловушки определялись в мемристоре на основе нитрида кремния в состоянии высокого сопротивления.

DOI: 10.31857/S0544126920050075

ВВЕДЕНИЕ

Оксид кремния (SiO_2) и нитрид кремния (Si_3N_4) составляют основу КМОП (кремний–металл–оксид–полупроводник) технологии [1]. В отличие от оксида кремния, нитрид кремния имеет высокую концентрацию электронных ловушек и широко используется в качестве среды хранения связанного заряда на ловушках во флэш-памяти на основе структуры нитрид тантала — оксид алюминия–нитрид–оксид–кремний ($\text{TaN}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4-\text{SiO}_2-\text{Si}$, TANOS или ТАНОС) [2].

В настоящее время мемристорная резистивная память с произвольным доступом Re RAM (Resistive Random Access Memory) разрабатывается для энергонезависимой памяти (Non-Volatile Memory, NVM) следующего поколения после флэш-па-

мяти (Flash) [3]. Необходимо отметить, что Re RAM вместе с памятью с изменением фазового состояния PCM (Phase Change Memory), магниторезистивной памятью с произвольным доступом MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory), сегнетоэлектрической памятью Fe RAM (Ferroelectric Memories) [4] являются востребованными видами энергонезависимой памяти на новых альтернативных принципах в сравнении с памятью на основе хранения заряда. Принцип функционирования мемристора основан на переключении диэлектрической активной среды между логическими состояниями с высоким резистивным состоянием (High Resistance State — HRS) и низким резистивным состоянием (Low Resistance State — LRS). В настоящее время изучаются в качестве ак-

тивной среды [2] различные нестехиометрические диэлектрики, такие как оксид гафния (HfO_x), оксид циркония (ZrO_x), оксид тантала (TaO_x), оксид алюминия (AlO_x), оксид ниобия (NbO_x) и оксид кремния (SiO_x). В настоящее время отмечено, что Si_3N_4 является перспективным резистивным переключающим слоем благодаря большому количеству ловушек [5–7].

Механизм переноса заряда в структуре МНОП: металл–нитрид–оксид–кремний с толстым слоем Si_3N_4 был исследован в работе [8]. Такая структура не проявляла мемристорных свойств и основным механизмом для переноса заряда была модель многофоновой ионизации изолированных ловушек. Механизм переноса заряда в мемристоре на основе нитрида кремния в низкоомном состоянии (LRS) был изучен в работах [9, 10]. В слабых электрических полях перенос заряда интерпретируется на основе эффекта Френкеля. В сильных полях перенос заряда интерпретируется в терминах туннельного эффекта Фаулера–Нордгейма. В работе [11], перенос заряда в состоянии LRS в нитриде кремния интерпретируется моделью на основе эффекта Шоттки.

Для мемристоров $\text{Ni/SiN}_x/p++\text{Si}$ в состоянии высокого сопротивления (HRS) с различными значениями параметра x механизм переноса заряда был изучен в работе [12]. Перенос заряда интерпретируется в рамках модели Френкеля. В работе [13], перенос заряда в состоянии LRS интерпретировался с точки зрения модели эффекта Шоттки. На интерфейсе $\text{Ni/Si}_3\text{N}_4$ получен дырочный барьер 0.301 эВ. Механизм транспорта заряда в нитриде кремния в состояниях LRS и HRS был изучен в работах [14, 15]. Перенос заряда интерпретируется на основе модели тока с ограниченным пространственным зарядом, без подробного обсуждения параметров модели.

Однако в настоящее время не существует единой универсальной модели переноса заряда в мемристоре на основе Si_3N_4 . В работе [15] механизм переноса заряда в мемристоре на основе PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition или плазмохимическое осаждение) SiN_x представляет собой фоновый облегченный туннелирование между ловушками.

Целью данной работы является экспериментальное исследование переноса заряда в МНОП мемристоре, сравнение с теорией и определение параметров ловушки в мемристоре.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования механизма переноса заряда в МНОП мемристоре с тонким слоем Si_3N_4 нами была изготовлена структура $\text{Ni/Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/p+\text{Si}$. Использовалась кремниевая подложка p типа с сопротивлением $0.005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Слой термическо-

го оксида SiO_2 толщиной 2 нм был сформирован путем термического окисления. Затем для резистивного переключающего слоя была нанесена пленка Si_3N_4 толщиной 4 нм с помощью химического осаждения из паровой фазы при низком давлении (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) при 700°C с использованием смеси дихлорсилана (SiH_2Cl_2) и аммиака (NH_3) (в соотношении $\sim 1 : 3$). Ионная имплантация (BF_2+ с энергией 40 кэВ и дозой $8 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) была выполнена через полученные слои для формирования высоколегированного слоя $p+$ типа в подложке. После имплантации был проведен быстрый термический отжиг при 1030°C . В финале верхний никелевый электрод Ni толщиной 100 нм был нанесен с помощью термического испарителя с использованием теневой маски. Диаметр никелевого электрода составлял 200 мкм. Вольтамперные характеристики измерялись полупроводниковым анализатором параметров Agilent B1500A. Нижний электрод ($p+\text{Si}$) был заземлен во время измерения. Экспериментальные вольт-амперные характеристики сравнивались с моделью Френкеля и моделью токов с ограниченным пространственным зарядом (Space Charge Limited Current, SCLC).

С помощью измерительной системы для контроля толщин диэлектриков Opti-Probe 7341XP фирмы KLA методом абсолютной эллипсометрии (эллипсометр с HeNe лазером, длина волны 632.8 нм) для простой оптической модели: Si-SiO_2 ($n = 1.46$), $\text{Si-Si}_3\text{N}_4$ ($n = 2.00$) были измерены толщины диэлектриков оксида кремния и нитрида кремния на кремниевых подложках соответственно, диэлектрические слои изготовлены с высокой однородностью. Для оксида кремния: среднее значение толщины 1.9 нм и разброс толщины менее 3%. Для нитрида кремния: среднее значение толщины 4.4 нм и разброс толщины менее 3%.

На рис. 1 показано, что типичное биполярное резистивное переключение с 10 циклами наблюдается в изготовленной структуре МНОП мемристора. Устройство было установлено в состояние включения (set) в соответствии с текущим ограничением тока (Compliance Current, CC) 3 мА, чтобы предотвратить постоянный пробой диэлектрика. Далее для процесса выключения (reset) использовалось также ограничение тока (CC) 3 мА. Положительное смещение приводит к переключению (set), при котором устройство переключается из состояния HRS в состояние LRS. Наша изготовленная структура МНОП без формовки демонстрирует воспроизводимое биполярное переключение. Рабочее напряжение находилось в пределах 3.6 ~ 5.0 В в течение заданного процесса ($V_{\text{set}} = 3.6 \sim 4.0 \text{ В}$, $V_{\text{reset}} = -1.6 \sim -2.2 \text{ В}$). Окно памяти (memory window) составило не менее 5 порядков. Отметим, что ток утечки достаточно мал (10^{-11} А при 1 В) при комнатной температуре в исходном состоянии.

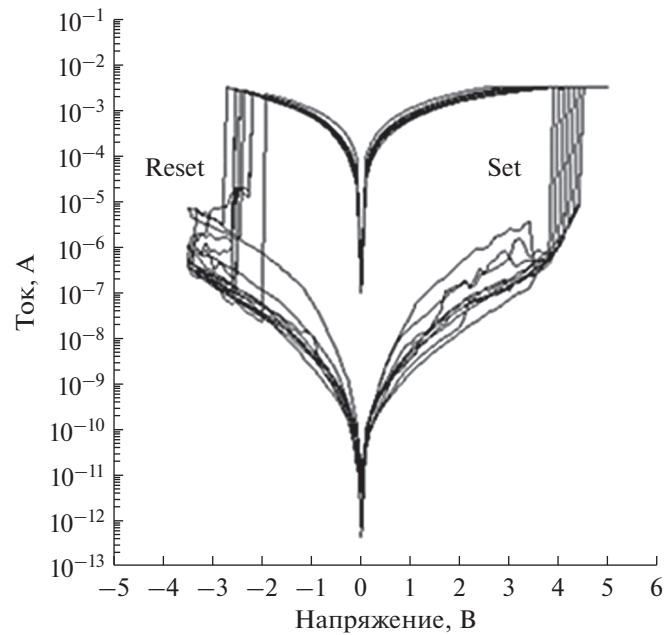


Рис. 1. Петля переключений HRS-LRS с 10 циклами для ReRAM на основе Si_3N_4 .

На рис. 1 показано, что состояние HRS не является стабильным, и это подтверждается дальнейшими циклами (см. рис. 2). Для измерения циклически использовались следующие параметры: время импульса 50 мс; $V_{\text{set}} = 4.5 \text{ В}$, $V_{\text{reset}} = -3.5 \text{ В}$ при ограничении тока при set/reset 3 мА. После 10 циклов измеряли сопротивление мемристора в состояниях HRS и LRS при $V_{\text{read}} = 0.5 \text{ В}$. Измерение хранения информации проводилось после термического нагрева при 85°C в разное время от 10 до 10^5 с при напряжении $V_{\text{read}} = 0.5 \text{ В}$ (рис. 3). Ток при 0.5 В в состоянии LRS не изменяется в течение 10^5 с .

Ток при 0.5 В в состоянии HRS увеличивается за 10^5 с , т.е. окно памяти увеличивается во времени, и, следовательно, невозможно экстраполировать данные на годы при комнатной температуре, чтобы оценить время хранения заряда.

Для моделирования экспериментальных данных только в нитридном слое вольт-амперные характеристики были пересчитаны с вычетом падения напряжения в слое SiO_2 из падения напряжения всей структуры. Для моделирования вольтамперной характеристики использовалась только часть с отрицательными напряжениями

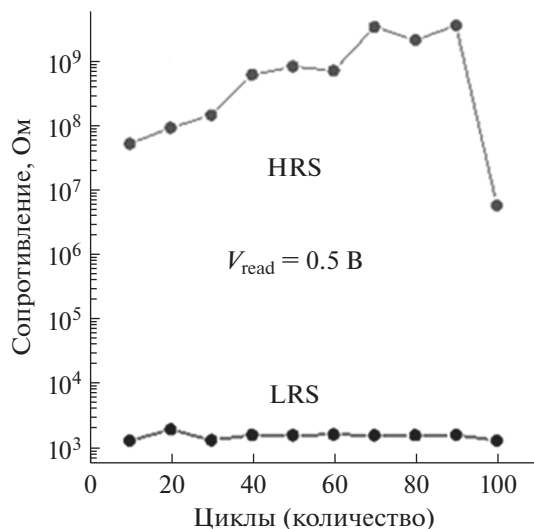


Рис. 2. Циклирование в МНОП мемристоре при комнатной температуре. Длительность импульса = 50 мс, $V_{\text{set}} = 4.5 \text{ В}$, $V_{\text{reset}} = -3.5 \text{ В}$, $V_{\text{read}} = 0.5 \text{ В}$.

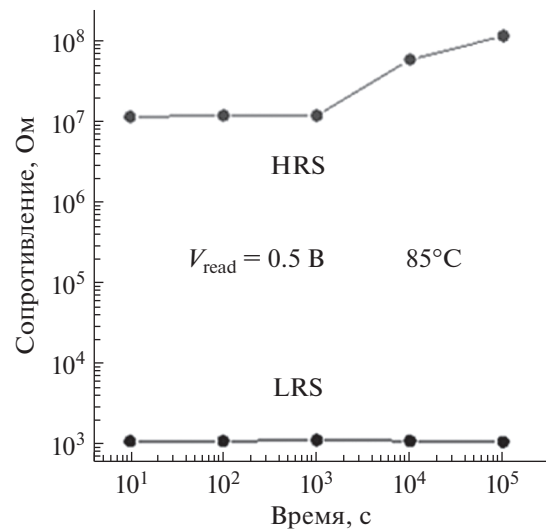


Рис. 3. Хранение информации в МНОП мемристоре при 85°C в состояниях HRS и LRS.

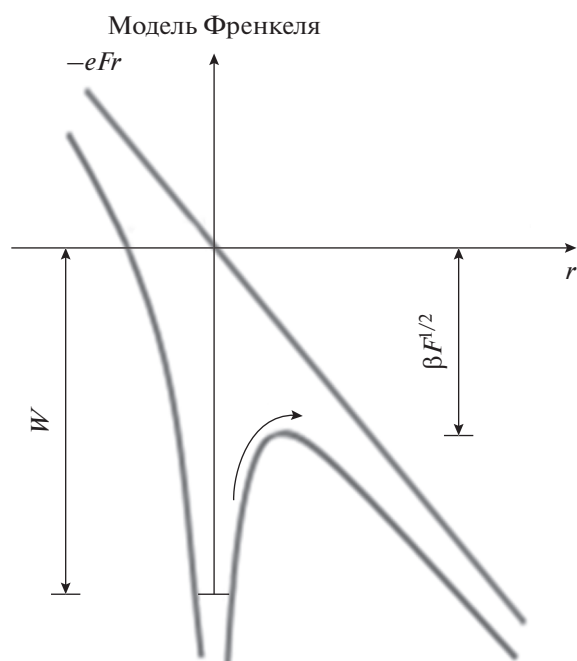


Рис. 4. Понижение потенциала изолированной кулоновской ловушки под воздействием приложенного электрического поля на основе модели Френкеля.

для исключения области пространственного заряда в подложки p -типа. Ток I в материале с ловушками описывается выражением [16, 17]:

$$I = eN^{2/3}SP. \quad (1)$$

Здесь e — заряд электрона, $N = a^{-3}$ — концентрация ловушки, a — среднее расстояние между ловушками, S — площадь контакта и P — вероятность ионизации ловушки.

Эффект Френкеля описывает понижение потенциала изолированной кулоновской ловушки под воздействием приложенного электрического

поля (рис. 4). Вероятность ионизации ловушки эффектом Френкеля описывается выражением [18, 19]:

$$P = \nu \exp\left(-\frac{W - \beta_F \sqrt{U/d}}{kT}\right), \quad \beta_F = \left(\frac{e^3}{\pi \epsilon_\infty \epsilon_0}\right)^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь $\nu = W/h$ — частотный фактор (введенный Френкелем), W — энергия ионизации ловушки, β_F — постоянная Френкеля, U — напряжение, d — толщина, k — постоянная Больцмана, T — температура, e — заряд электрона, ϵ_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 — диэлектрическая константа.

Из вольтамперных характеристик МНОП мемристора в состоянии HRS с использованием модели Френкеля следует значение энергии ионизации ловушки $W = 0.62$ эВ. Частотный фактор определяется из выражения $\nu = W/h$ и равен $\nu = 1.5 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Из экспериментальных данных МНОП мемристора в состоянии HRS с использованием модели Френкеля следует anomalно малая концентрация ловушек $N = 1 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$. Кроме того, модель Френкеля дает anomalно большое значение высокочастотной диэлектрической проницаемости $\epsilon_0 = 100$ (рис. 5). Поэтому модель Френкеля не описывает вольт-амперные характеристики мемристора МНОП в состоянии HRS. Вольт-амперные характеристики мемристора МНОП в состоянии LRS слабо зависят от температуры, и поэтому модель Френкеля непригодна для описания переноса заряда в состоянии LRS.

Теория тока ограниченного пространственным зарядом (SCLC) между плоскими параллельными электродами подробно представлена в работе [20]. Ток в модели SCLC состоит из нескольких компонент с различными зависимостями тока от напряжения. В нашем случае существуют омические и квадратичные части, которые задаются выражением [21]:

$$I = I_{\text{Ohm}} + I_{\text{SCLC}} = Se\mu n \frac{U}{d} + S \frac{9}{8} \mu \epsilon \epsilon_0 \theta \frac{U^2}{d^3}, \quad (3)$$

$$n = \frac{2N_d}{1 + \sqrt{1 + \frac{4gN_d}{N_c} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)}}, \quad N_c = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2}, \quad \theta = \frac{1}{1 + \frac{N_t}{N_c} \exp\left(\frac{W_t}{kT}\right)}. \quad (4)$$

Здесь S — площадь, вовлеченная в перенос заряда, μ — подвижность электронов, n — концентрация свободных электронов в диэлектрике, ϵ — статическая диэлектрическая проницаемость, θ — доля свободных электронов от всех инжектированных (захваченных и свободных), N_d — концентрация доноров, g — коэффициент вырождения, N_c — эффективная плотность состояний, E_a — энергия ак-

тивации донора, N_t — концентрация ловушки, W_t — энергия ловушки, m^* — эффективная масса электрона, h — постоянная Планка.

Модель SCLC имеет много параметров. Чтобы уменьшить количество переменных параметров, некоторые параметры взяты из опубликованных данных. Значения эффективной массы ($m^* = 0.5 m_e$) и статической диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 7$) были взяты из типичных зна-

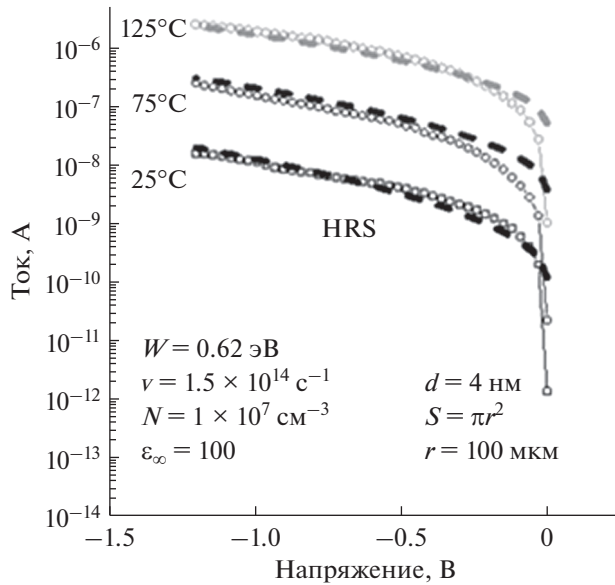


Рис. 5. Вольтамперные характеристики структуры ReRAM Ni/Si₃N₄/SiO₂/p⁺ -Si в состоянии HRS и кривые моделирования на основе модели Френкеля.

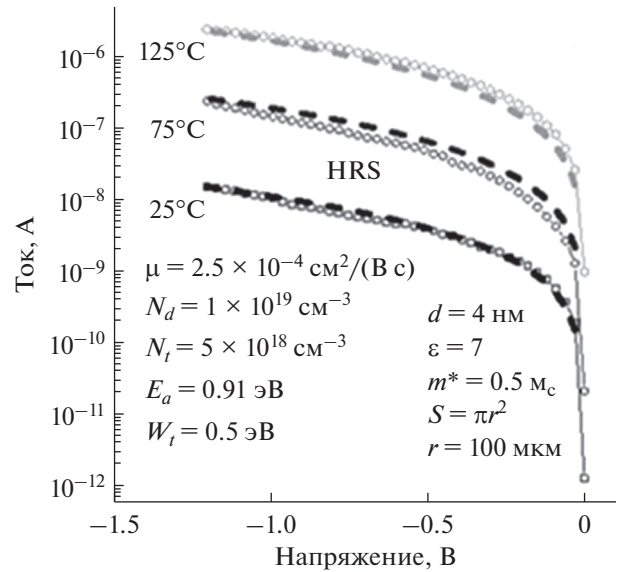


Рис. 6. Вольтамперные характеристики структуры ReRAM Ni/Si₃N₄/SiO₂/p⁺ -Si в состоянии HRS и кривые моделирования на основе модели SCLC.

чений для Si₃N₄ [22–24]. Поскольку эксперимент показал, что МНОП мемристор без формовки, в состоянии HRS мы принимаем параметр S в качестве всего контакта ($r = 100$ мкм). Мы предполагаем модель проводимости филамента в структуре MNOS в LRS, где филамент представляет собой аморфный кремний. Поэтому для случая LRS мы взяли подвижность, равную подвижности в аморфном кремнии ($\mu = 1$ см²/(В·с)). Концентрация доноров определяет теоретический наклон кривой в модели SCLC при низких напряжениях, а концентрация ловушек определяет наклон при высоких напряжениях. Вольтамперные характеристики мемристора МНОП в HRS хорошо описываются моделью SCLC с концентрацией доноров $N_d = 1 \times 10^{19}$ см⁻³, энергией активации $E_a = 0.91$ эВ, концентрацией ловушек $N_t = 5 \times 10^{18}$ см⁻³ и энергией ловушки $W_t = 0.5$ эВ (рис. 6). Перенос заряда проходит через всю площадь контакта и однородность, полученная из модели SCLC, представляет собой подвижность, равную $\mu = 2.5 \times 10^{-4}$ см²/(В·с), которая близка к значению, полученному в [25]. Энергия активации доноров из модели SCLC довольно велика из-за глубоких ловушек. Все это указывает на то, что перенос заряда происходит через материал нитрида кремния. Вольт-амперные характеристики МНОП мемристора в состоянии LRS слабо зависят от температуры, поэтому $\theta = 1$ (рис. 7). Хотя вольтамперные характеристики МНОП мемристора в состоянии LRS слабо зависят от температуры, с ростом температуры ток в омическом сечении вольтамперной характеристики увеличивается, и это указывает на то, что природа филамента ближе к полупроводнику, чем к металлу. По сравнению с

экспериментом модель SCLC дает следующие параметры: концентрация доноров $N_d = 1 \times 10^{20}$ см⁻³ и энергия активации $E_a = 0.06$ эВ. Если взять параметр подвижности как для аморфного кремния, то эффективный радиус такого филамента, согласно модели SCLC, будет $r = 50$ нм. Механизм переноса заряда и свойства накопления заряда в мемристоре сильно зависят от технологии изготовления активного слоя мемристора. Толщина оксида и нитрида кремния сопоставима с МНОП из работы [5], но из-за другой технологии

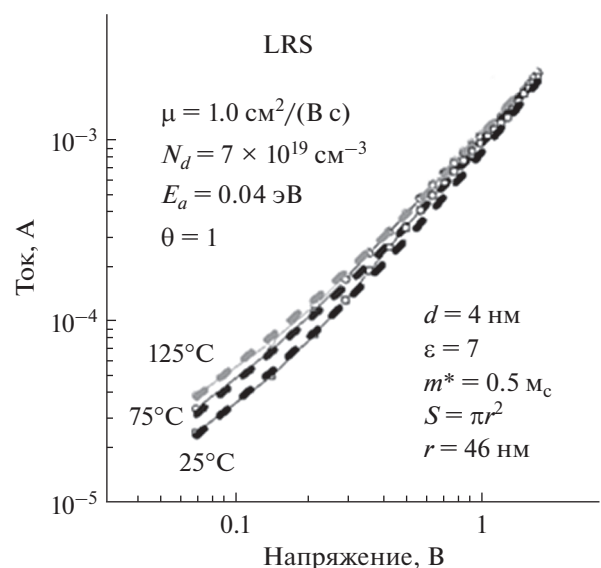


Рис. 7. Вольтамперные характеристики структуры ReRAM Ni/Si₃N₄/SiO₂/p⁺ -Si в состоянии LRS и кривые моделирования на основе модели SCLC.

изготовления окно памяти наших МНОП мемристоров больше и не требует процедуры формовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были получены структуры МНОП, проявляющие мемристорные свойства. Мемристор МНОП не требует процедуры формовки. Мемристор МНОП имеет окно памяти примерно 5 порядков. Основной механизм переноса заряда в МНОП мемристоре в состоянии HRS описывается моделью тока ограниченного пространственным зарядом (SCLC) с ловушками. В состоянии LRS транспортный механизм описывается моделью SCLC с заполненными ловушками. Концентрация ловушек $N_t = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и энергия ловушек $W_t = 0.5 \text{ эВ}$ были определены в нитриде кремния в состоянии HRS.

Благодарности: Изготовление экспериментальных образцов и экспериментальные исследования были выполнены по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-03018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красников Г.Я., Орлов О.М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0.18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. С. 124–128.
2. Gritsenko V.A. Silicon Nitride on Si: Electronic Structure for Flash Memory // in Thin Films on Si: Electronic and Photonic Applications, edited by V. Narayanan, M. Frank and A.A. Demkov // World Scientific Press. 2016. P. 273–322.
3. Zidan M.A., Strachan J.P., Lu W.D. The future of electronics based on memristive systems // Nat Electron. 2018. V. 1. № 1. P. 22–29.
4. Islamov D.R., Gritsenko V.A., Perevalov T.V., Pustovarov V.A., Orlov O.M., Chernikova A.G., Markeev A.M., Slesazek S., Schroeder U., Mikolajick T., Krasnikov G.Y. Identification of the nature of traps involved in the field cycling of $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ -based ferroelectric thin films // Acta Materialia. 2019. № 166. P. 47–55.
5. Jiang X.F., Ma Z.Y., Xu J., Chen K. J., Xu L., Li W., Huang X.F., Feng D. a-SiNx:H-based ultra-low power resistive random access memory with tunable Si dangling bond conduction paths // Sci Rep-Uk. 2015. V. 5. № 15762.
6. Kim S., Jung S., Kim M.H., Cho S., Park B.G. Resistive switching characteristics of Si_3N_4 -based resistive-switching random-access memory cell with tunnel barrier for high density integration and low-power applications // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 21. № 106.
7. Hong S.M., Kim H.D., An H.M., Kim T.G. Effect of work function difference between top and bottom electrodes on the resistive switching properties of SiN films // Ieee Electr Device. 2013. V. 9. № 34. P. 1181–1183.
8. Nasyrov K.A., Gritsenko V.A., Kim A.K., Chae H.S., Chae S.D., Ryu W.I., Sok J.H., Lee J.W., Kim B.M. Charge transport mechanism in metal-nitride-oxide-silicon structures // Ieee Electr Device. 2002. V. 6. № 23. P. 336–338.
9. Kim S., Jung S., Kim M.H., Chen Y.C., Chang Y.F., Ryoo K.C., Cho S., Lee J.H., Park B.G. Scaling Effect on Silicon Nitride Memristor with Highly Doped Si Substrate // Small. 2018. V. 19. № 14.
10. Kim S., Kim H., Hwang S., Kim M.H., Chang Y.F., Park B.G. Analog Synaptic Behavior of a Silicon Nitride Memristor // Acs Applied Materials & Interfaces. 2017. V. 46. № 9. P. 40420–40427.
11. Kim S., Chang Y.F., Park B.G. Fully Si compatible SiN resistive switching memory with large self-rectification ratio // Rsc Adv. 2017 V. 29. № 7. P. 17882–17888.
12. Kim S., Chang Y.F., Kim M.H., Park B.G. Improved resistive switching characteristics in Ni/SiNx/p(++)-Si devices by tuning x // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 3. № 111.
13. Kim S., Cho S., Park B.G. Fully Si compatible SiN resistive switching memory with large self-rectification ratio // Aip Adv. 2016. V. 1. № 6.
14. Kim S., Jung S., Kim M.H., Kim T.H., Bang S., Cho S., Park B.G. Nano-cone resistive memory for ultralow power operation // Nanotechnology. 2017. V. 12. № 28.
15. Tikhov S.V., Mikhaylov A.N., Belov A.I., Korolev D.S., Antonov I.N., Karzanov V.V., Gorshkov O.N., Tetelbaum D.I., Karakolis P., Dimitrakis P. Role of highly doped Si substrate in bipolar resistive switching of silicon nitride MIS-capacitors // Microelectron Eng. 2018. № 187. P. 134–138.
16. Gritsenko V.A., Perevalov T.V., Voronkovskii V.A., Gismatulin A.A., Kruchinin V.N., Aliev V.S., Pustovarov V.A., Antonov I.N., Karzanov V.V., Gorshkov O.N., Tetelbaum D.I., Karakolis P., Dimitrakis P. Role of highly doped Si substrate in bipolar resistive switching of silicon nitride MIS-capacitors // Microelectron Eng. 2018. № 187. P. 134–138.
17. Islamov D.R., Gritsenko V.A., Chin A. Charge Transport in Thin Hafnium and Zirconium Oxide Films // Optoelectronics Instrumentation and Data Processing. 2017. V. 2. № 53. P. 184–189.
18. Frenkel J. On the theory of electric breakdown of dielectrics and electronic semiconductors // Technical Physics of the USSR. 1938. V. 8. № 5. P. 685–695.
19. Frenkel J. On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semiconductors // Physical Review. 1938. № 54. P. 647.
20. Lampert M.A., Mark P. Current injection in solids // Academic Press. 1970.
21. Voronkovskii V.A., Aliev V.S., Gerasimova A.K., Islamov D.R. Conduction mechanisms of TaN/HfO₂/Ni memristors // Mater Res Express. 2019. V. 7. № 6.
22. Shaposhnikov A.V., Petrov I.P., Gritsenko V.A., Kim C.W. Electronic band structure and effective masses of electrons and holes in the α and β phases of silicon nitride // Phys. Solid State. 2007. V.9. № 49. P. 1628–1632.
23. Gritsenko V.A. Electronic structure of silicon nitride // Phys. Usp. 2012. V. 5. № 55. P. 498–507.
24. Gritsenko V.A., Meerson E.E., Morokov Y.N. Thermally assisted hole tunneling at the Au-Si₃N₄ interface and the energy-band diagram of metal-nitride-oxide-semiconductor structures // Physical Review. 1998. V. 4. № 57. P. 2081–2083.
25. Hattori R., Shirafuji J. Longitudinal electron drift mobility of hydrogenated amorphous silicon/silicon nitride multilayer structures revealed by time-of-flight measurements Appl Phys Lett. 1989. V. 12. № 54. P. 1118–1120.